

中学校理科における「運動」について

— 等速直線運動を中心に —

佐 藤 信 *

この研究では、まず、記録タイマーを使った力学台車の運動が減速する原因を、タイマーの打点を解析する方法で探った。その結果、アクリル板上における質量 0.91kg の大型台車の例では、平均 50cm/s の時、タイマーの影響は、面との摩擦と同程度の 1.4 g 重で、空気の抵抗の約半分であることが明らかになった。そこで、運動体に対するこの空気抵抗の影響を生徒に理解させる補助教具として、長時間観察できるフラスコ中の振り子の運動を提案した。さらに、「運動」と「力」との関係で、「運動している物体には力が残る」という生徒の思考の傾向を重視した指導計画について検討した。

1. はじめに

中学校理科第 1 分野の内容 (6) アの「運動」の中で等速直線運動が扱われる。その場合に、力学台車と記録タイマーとがよく使われる。生徒自身が位置と経過時間を測定し、そのデータを基に「速さ—時間」のグラフを作成し、速さについて考察する¹⁾のに便利だからである。しかし、実際に生徒の得た「速さ—時間」のグラフでは、速さが一定にならず減少することが多い。

そこで、力学台車と記録タイマーを使った場合、どんな力がどの程度の割合で、等速直線運動を妨げているのかを調べ、どういう使い方をしたら最も等速直線運動に近くなるか検討した。

また、等速直線運動と対をなす慣性について、生徒はいつまでも等速直線運動を続けることを知識として理解できても、それには実感が伴わない。実際、何十分も等速直線運動を観察させることは不可能に近い。そこで、等速運動ではないが、長い時間運動し続けることを生徒に示す教具を開発した。

同時に、難解であるといわれる「運動」の指導を生徒が納得しやすいようにするためにはどうしたらよいか、「運動」とそれにかかわる力の面から検討したので報告する。

2. 力学台車の実験

等速直線運動のための運動物体には、エアバック、エアトラック、力学台車、球体などがある。また、ストロボ写真、記録タイマーなどで、その運動を記録している。この内、高校の理振用備品であるエアトラックについては、等速運動に近い運動を行うと考えられるため、研究報告も多い。²⁾³⁾⁴⁾

中学校では、とくにエアトラックのような特殊な装置を使わないで、生徒自らが実験し、生徒一人ひとりのデータを得て、それをグラフにしたり、解釈したりして科学の方法を身につけることが大切である。その意味で、力学台車と記録タイマーという組合せが優っている。

* 理科長期研修員 (見附市立理科教育センター・見附市立見附中学校)

ところが、この組合せでは、図1のように右下がりのグラフになることが多い。この原因にはどのような力があり、それぞれの力の相対的な大きさはどの程度なのかを記録テープの打点を解析する方法で明らかにする。さらに等速直線運動に近づけるためにはどうしたらよいかを探る。

(1) 運動している力学台車に影響を及ぼす力

記録テープをつけた力学台車には、図2に示したように次の力がはたらいていると考えられる。

- ア. 面と車軸から台車を受ける摩擦力 μmg
- イ. タイマーによる摩擦力 Ft
- ウ. 台車の空気抵抗による力 βv
- エ. 面の傾きによる力 $mg \sin \theta$

但し、 m は台車の質量、 v は台車の速さ、 g は重力加速度、 β は空氣の摩擦に関する比例定数、 μ は動摩擦係数、 θ は水平面と台とのなす角の大きさを示す。

そこで、台車がこれらの力を受けて、加速度(速度減少率) a を生じたとして、次の式を得る。

$$ma = -\mu mg - Ft - \beta v - mg \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

$$a = -\mu g - Ft/m - \beta v/m - g \sin \theta \dots\dots\dots (2)$$

なお、テープの質量などは無視できるものとする。今後、 a の値は $-a$ の値を使用することにする。

以上、(1)、(2)の式を考慮しながら、図2の実験装置を用いて、速度減少率 a を測定した。

(2) 面の傾き ($mg \sin \theta$ の項)

左から右、及び右から左に台車を走らせた時の速度減少率を a_l 、 a_r とすると、面の傾き θ による減少率 $g \sin \theta$ は(2)式より、次の式になる。

$$g \sin \theta = (a_l - a_r) / 2 \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式から、図3の場合の面の傾きは、 $\sin \theta \approx 1.4 \times 10^{-3}$ である。この値は、およそ1mの長さの面の右方が1.4mm高くなっていることを示す。このように、わずかの面の傾きでも、台車の運動は大きな影響を受ける。

(3) 面との摩擦 (μmg の項)

旧台車^{*1}と新台車^{*3}を面の状態を変えて走らせた。その結果、2種の台車間には大差は認められない。

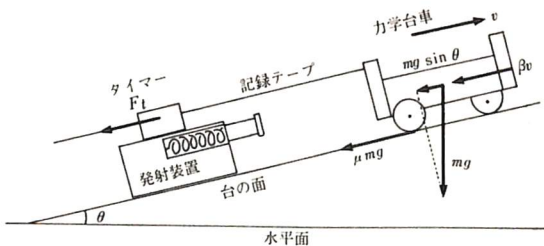


図2 実験装置及び力学台車にはたらく力

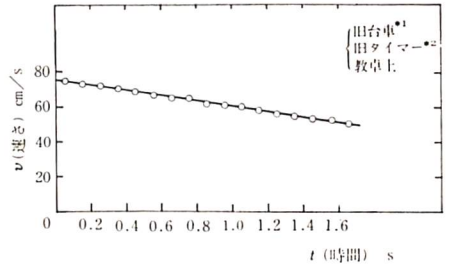


図1 力学台車の速さの変化

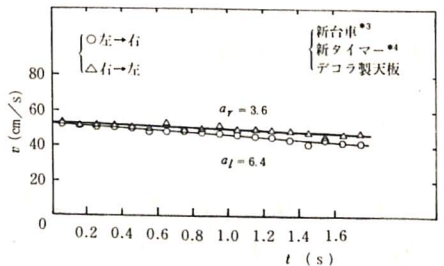


図3 床面の傾きによる速さの変化

*1 DY-3型 *2 C-3054型 *3 DY-1000型 *4 C-3055型 いずれもナカムラ製

表 1. 面の状態及び台車の種類による速度減少率 a の値

面 の 状 態	旧台車 ^{*1} (大型, 0.91kg)	新台車 ^{*3} (小型, 1.00kg)
教卓：化粧板なし。古く、凸凹がある。	15 (70)	17 (70)
アクリル板：教卓の上に、アクリル板を敷く。	5 (50)	7 (70)
アクリル板の上に、新聞紙を10枚重ねにした場合	18 (50)	—
デコラ製天板：固い（パイプ机の上面）	5 (50)	7 (70)

単位 cm/s^2 , () は、その時の最初の速さ (cm/s^2), 旧タイマー^{*2} 使用

ところが、表 1 のように、化粧板のない教卓にアクリル板を敷いただけで、速度減少率は半分以下になる。

また、初速を一定にして、質量と速度減少率との関係を調べてみたら、図 4 のグラフを得た。図 4 中の曲線は μ , β を一定とした時の(2)式である。教卓上とアクリル板上とでは、速度減少率の値ばかりでなく、増減のしかたも異なる。

以上のことから、台車の運動を等速運動に近づけるためには、アクリル板か何か固くなめらか板を敷く必要がある。

(4) タイマーによる摩擦 (Ft の項)

本研究で使用した新旧の打点式タイマーは、同じ条件で使用した時にほとんど同じ速度減少率の値を示した。

そこで、カートリッジペン式タイマー^{*5} のテープガイドを図 5 のように改造し、テープの代わりに糸を通せるように工夫した。その結果、図 6 のように、 a の値そのものは小さくなった。しかし、細かい枝糸がテープガイドにひっかかるなどのため、測定値のばらつきが大きいのが難点である。

(5) 空気抵抗による速度の減少 (βv の項)

ア. 台車の前部に、板をつけた場合の空気抵抗の影響

台車の前部に、風よけフードをつけて、つけない場合と比較してみたが、あまり差が出なかった。そこで、逆に空気抵抗を大きくするために台車の前部に面積 1510 cm^2 厚さ 2 mm のアクリル板をつけた台車と、板なし（前部の面積 90 cm^2 ）の台車とを比較した。図 7 のように、板つきの場合が a の値は大きい。また、速さが大きくなるにつれて差も大きくなる。

イ. 空気抵抗の大きさ

(2)式より、左右の速度減少率の平均 \bar{a} を求めると、次の式が得られる。

$$\bar{a} = -(\mu g + Ft/m) - (\beta/m) \cdot v \quad \cdots \cdots (4)$$

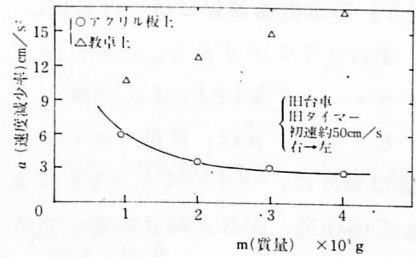


図 4 面による速度減少率のちがい

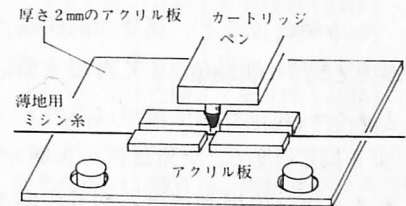


図 5 糸タイマーの構造

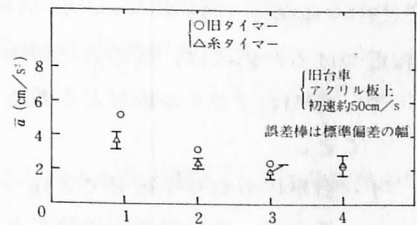


図 6 旧タイマーと糸タイマーの比較

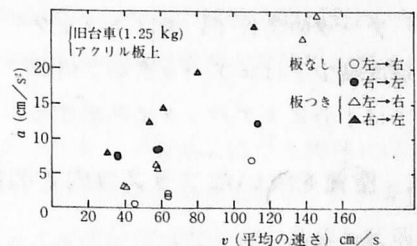


図 7 板つき台車の速度減少率

* 5 島津製 T1-5 形

よって、 μ 、 Ft が速さによらない量と仮定すると、「 $\alpha-v$ 」のグラフの傾き、切片はそれぞれ表2に示す式となる。

板なしの旧台車を使った図8の例では、 $\beta/m = 5.6 \times 10^{-2} /s$ 、 $(\mu g + Ft/m) = 2.7 \text{ cm/s}^2$ を得る。つまり、速さ50 cm/s の時 $a = 5.5 \text{ cm/s}^2$ の半分が空気抵抗による速度減少を意味し、速さの増大に伴ない、全体の速度減少率に対する空気抵抗の影響の占める割合が大きくなる。

(6) 等速直線運動に近づけるには

(4)の式を変形すると、次式を得る。

$$\bar{a} = -\mu g - (Ft + \beta v)/m \dots\dots\dots (5)$$

ここでは、 μ は、質量 m にもよらず一定と仮定すると、傾き及び切片は、(4)式と(5)式より表2のようになる。

この結果、図8と図9から、アクリル板上で旧台車を走らせ、新タイマーで記録する場合に、 $m = 0.91 \times 10^3 \text{ g}$ で $v = 50 \text{ cm/s}$ より、表3の値を得る。

この値によると、速さが約80 cm/s 以内で、(4)及び(5)式は、図8と図9の実験値をよく再現する。また、表3の値を考察するとタイマーによる速度減少は意外と小さく、摩擦力による速度減少と同じ程度で、空気抵抗の影響が最も大きいことになる。糸タイマーの場合には、図6の旧タイマーとの比較により、タイマーの影響 Ft がほとんど0であるといえる。

以上の結果、記録タイマーをつけた力学台車を等速直線運動に近づけるためには、次の点に留意する必要がある。

- ア. 面には、アクリル板などを敷き、なめらかで固い面にする
- イ. 台車におもりを載せて3 $\text{kg} \sim 4 \text{ kg}$ にすること。
- ウ. 速さは、空気抵抗と実験のしやすさから、50 cm/s 前後が適当であること。

ア～ウの条件で、エアトラックの場合と比較すると、²⁾³⁾ 台車の速度減少率はエアパックの2倍弱である。台車も使い方によっては十分にエアパックに匹敵することがわかる。

3. 空気を抜いたフラスコ内での振り子の運動

進行方向に外からの力が加わらない場合、運動している物体は等速直線運動を続ける性質(慣性)がある。これは、生徒に

表2. グラフの傾きと切片の意味

縦軸—横軸	傾 き	切 片
$\bar{a} - v$	β/m	$\mu g + Ft/m$
$\bar{a} - m^{-1}$	$Ft + \beta v$	μg

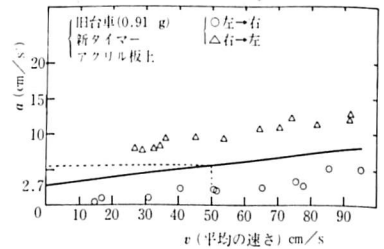


図8 速さと速度減少率

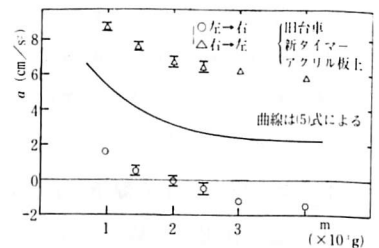


図9 質量と速度減少率

表3. 水平面上を運動する台車の速さを遅くする要因の値
旧台車, 新タイマー使用
 $m = 0.91 \times 10^3 \text{ g}$, $v = 50 \text{ cm/s}$

要因	値
μg	1.35 cm/s^2
Ft/m	1.35 cm/s^2
$\beta v/m$	2.8 cm/s^2
μ	1.4×10^{-3}
Ft	$1.2 \times 10^3 \text{ dyn}$
β	51 g/s

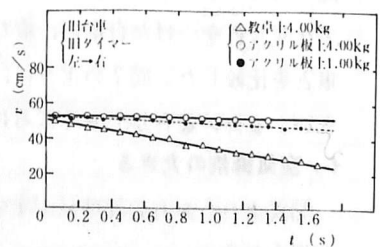


図10 速さの変化

とって、実感を伴った理解になりにくい。実験器具の大きさや減速のために、「等速直線運動」を何十秒も何分も継続して観察させることが困難なためである。

そこで、「等速直線運動」ではないが、一旦運動を始めた物体は、摩擦力や空気抵抗がなければ、何十分でも動き続けることを観察させることが、慣性のみならず、エネルギー的な考え方からも重要になってくる。このねらいに迫る観察実験として、「空気を抜いたフラスコ内での振り子の運動」の実験を考えたので紹介する。

（１）教具のしくみと使い方

真空鈴用のガラス管とフラスコ⁵⁾を用いて、図11のような装置を作る。糸にはナイロンのストッキングの糸を使用する。この振り子の支点に針をつけて、使用する時だけゴム栓に刺し、固定する。同じ装置を２つ作る。

両方のフラスコの空気を抜き、一方は抜いたまま、他方には再び空気を入れ、中の振り子を振らし、振れ方を観察させる。

（２）実験結果と考察

表４は、図11のA・B２種類の振り子の振幅が $2/3$ になる時の時間を示したもので、A・Bとも、ほぼ同じで、空気を抜いた時の方が空気中より４倍以上も振れ続ける。また、空気を抜いた方は１時間経っても、わずかに振れ続けるのに対し、空気中ではほぼ15～20分後に完全に止まってしまう。したがって、１時間の授業の中で、運動し始めた物体が運動し続けることを観察させることができるので、振り子の運動は効果的であろう。

4. 「運動」の指導上の問題点と指導計画

小単元「運動」では、日常生活で見られるいろいろな運動を速さと向きから分類し、速さの変化の原因が力であることに気づかせることがねらいである。

ところで、この運動の単元は、生徒にとって難解であると言われる。その原因は、速さを求める方法がわかりにくく、「力」と「運動エネルギー」とを混同するからだと考えられる。前者の問題点は、運動体の「位置」と「時間」の確認を各データについて行い、区間の長さと平均の速さとの関係に目を向けさせることによって、解決されると思われる。

次に、生徒は「力」と「運動エネルギー」の関係を明確には区別できず、「運動し続ける物体には力がある（加えられた力が残っている）」と考えがちである⁶⁾。そこで、この実態を知るために、新潟県内の中学３年生男子503名、女子466名、計969名を対象にアンケート調査を行った。その結果を整理すると図12のようになる。

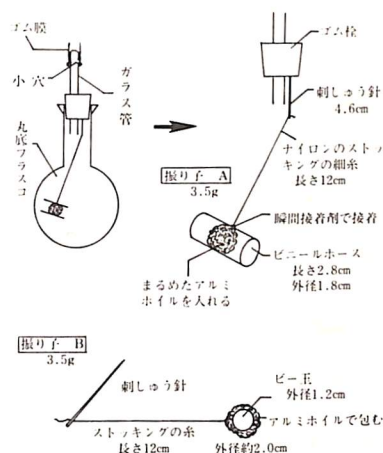
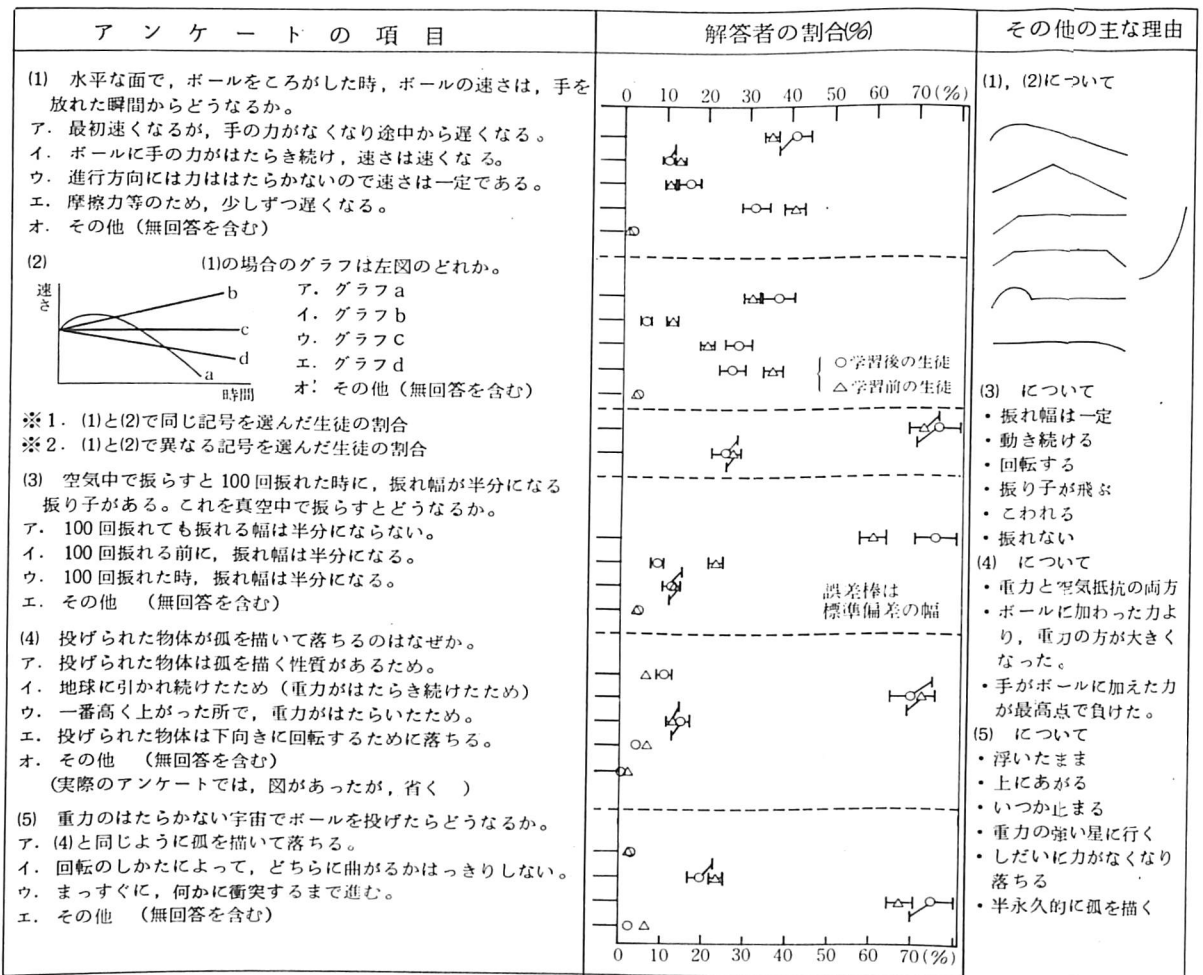


図11 振り子の装置とそのつくり方

表 4. 振幅が $2/3$ (3.8→2.5 cm) に減衰する時間

状況\振り子A	時間（標準偏差）
空気を抜いた時	6分56秒(39秒)
空気中	1分17秒(9秒)
状況\振り子B	時間（標準偏差）
空気を抜いた時	7分7秒(32秒)
空気中	1分24秒(5秒)

空気を抜いた時には、実験後フラスコに容積の92～98%の水が入る。



対象：題材「等速直線運動」を学習前の生徒 693 名，学習後の生徒 276 名，計 969 名の中学 3 年生

図12 アンケート項目とその結果

(1) 指導上の問題点と対策

アンケートの結果、生徒は、運動を力との関連でとらえようとしている。〔項目(1)全部、(4)イ・ウ・オ、(5)エ〕 また、一担、運動し始めた物体は運動し続けると考えている。〔項目(3)ア・エ (5)ウ・エ〕 このように望ましい傾向がある反面、いくつかの問題点を指摘できる。特に、生徒が、運動体の持つ「運動エネルギー」を体験的に運動体自身の「中にある力」と感じており、速さの原因となる「外からの力」とを混同している点に注目したい。〔項目(1)；(2)ア・オ、(4)ウ・オ、〕

そこで、生徒が「力」と「運動」との関係をとらえることができるように、生徒の考える「力」を初めから否定するのではなく、容認しながら、それぞれの問題点が無理なく解決できる指導の手だてを考えた。その主な内容が表5である。「中にある力」は、中学生の指導上は運動エネルギーにつながると思われるから、量の増減にも触れ、小単元「エネルギー」にも結びつくように配慮した。

表 5 運動の指導上の問題点及びその問題点を解決する手だて

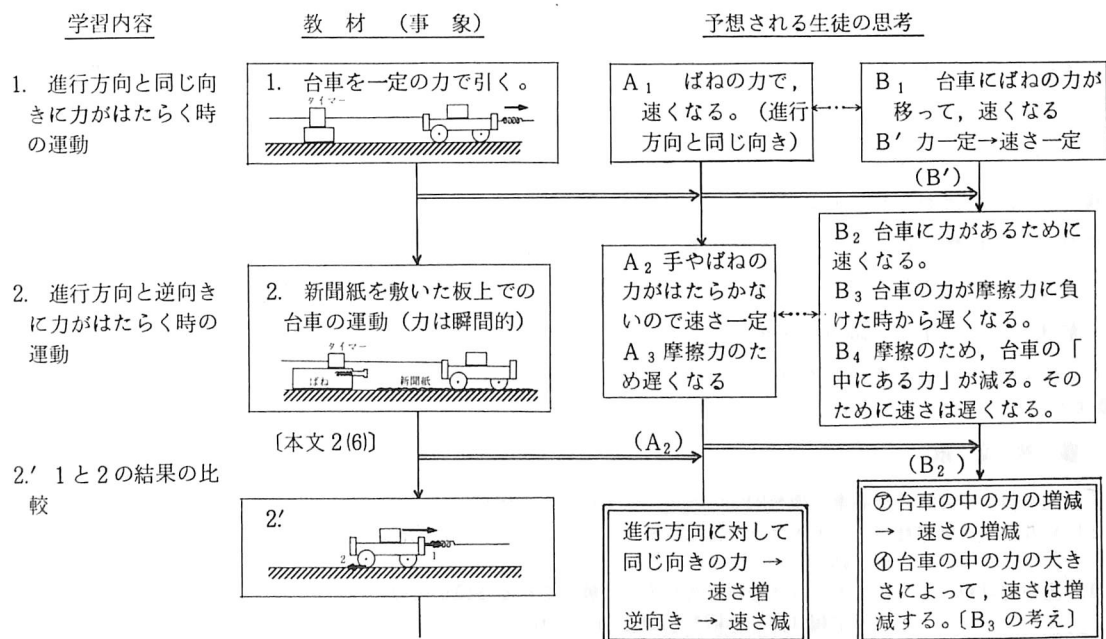
問 題 点	解 決 の 手 だ て		
① 運動している物体には力が残っていると考える生徒が多い。〔項目(1)など〕	生徒が考える、運動体の持っている「力」を認め、この運動体の「中にある力」を「運動エネルギー」として捉えさせる。		
② 運動している物体の「中にある力」のために、手から物体が放れた後も速さが速くなると考えがちである。 〔項目(1), (2)〕	運動体の持つ「中にある力」と、他の物体が加える「外からの力」とを区別させる。速さの変化との関係を次のように整理させる。		
	「外からの力」	「中にある力」「いきおい」	速さの変化
	進行方向と同じ向きにはたらく時	「外からの力」をもらい、量が増える時	速くなる
	進行方向と逆向きにはたらく時	「外からの力」のために、量がへる時	遅くなる
	進行方向に力がはたらかない時	「外からの力」がないので量は増減しない時	一 定
③ 学習済みの生徒は、運動体が減速する原因（摩擦など）をないがしろにする傾向がある。〔項目(1)エ〕	最初に摩擦の大きな面で、続いて摩擦の小さな面でそれぞれ台車を走らせて、両方の運動を比較させる。進行方向と逆向きの力（摩擦力や空気抵抗）を小さくすると速さが一定に近づくことを導く。		

（２）生徒の思考を重視した指導の流れ

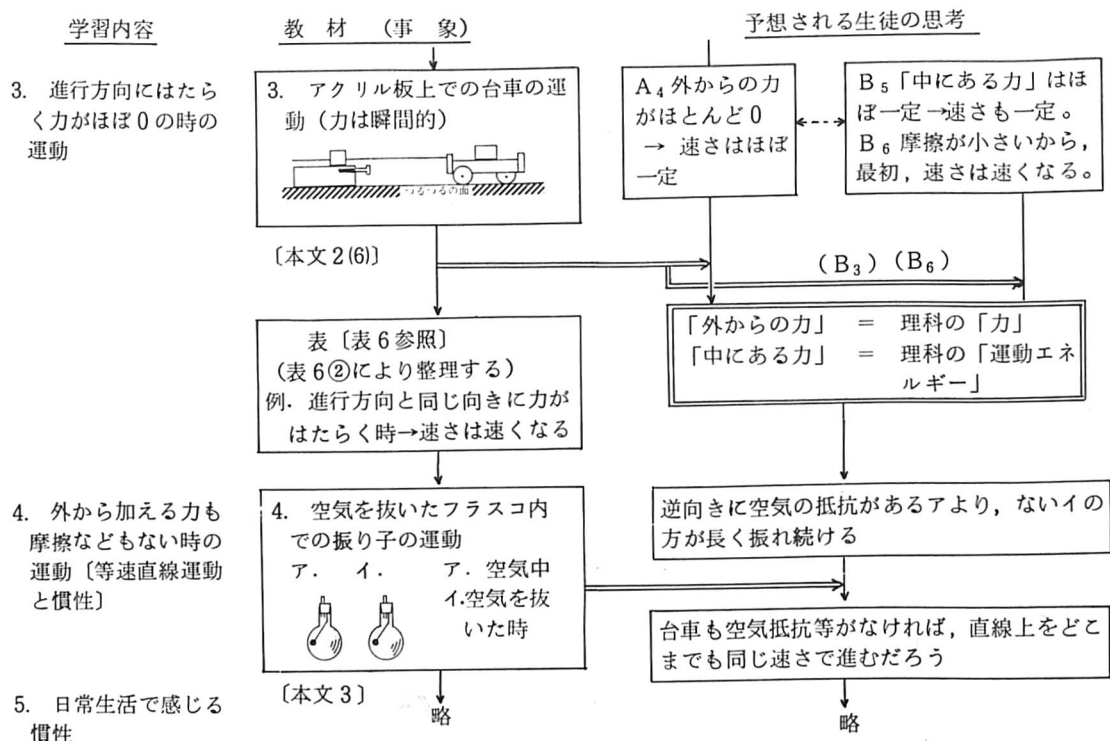
運動している物体の速さと「力」とについて、生徒がどう考えているかによって、A・Bの2タイプに分けて、予想される思考と指導の流れを想定した。なお、運動の特徴等の思考については省略した。

A：運動を、「運動の様子を変える」はたらきをする作用（理科でいう力）から考察するタイプ。

B：運動体は「何か力」（理科で言う運動エネルギー）があるから動くと考えるタイプ。



↓ 教材や思考の流れ, ⇒⇒⇒ 実験結果による考察, ⇐⇐⇐ 生徒同志のはたらきかけ, () 否定される考え



5. おわりに

力学台車の運動を記録タイマーを使って測定する場合、机にアクリル板を敷き、台車におもりを載せて実験すると、等速直線運動に近づき、エアトラックの場合の速度減少率の2倍より小さくなる。

この時、タイマーの摩擦力は小さく、面の摩擦力と同等で、空気の抵抗による力が最も大きい。

生徒は、運動体をエネルギー的な立場から見ていることが多い。そこで、生徒のこのような思考を重視した指導の流れを作成し、その中に、運動の持続性（エネルギーの保存性）を示す教具（空気を抜いたフラスコ内での振り子の運動）を位置づけた指導計画の作成を試みた。

今後は、授業実践を通して、生徒の思考を重視した「運動」の指導のあり方を検討してゆきたい。

最後に、アンケート調査を実施していただきました各中学校の校長先生はじめ諸先生方から、あたたかいご理解とご協力をいただきました。心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 文部省： 中学校指導書 理科編 初版，大日本図書（1978）
- 2) 新井洋二・安達健： エアトラック実験における水平調整と空気抵抗による影響，物理教育，**23**，3，（1974），45～47
- 3) 安達健ほか： エアトラックを使用した力学実験における空気抵抗および滑走台の水平度について，電気通信大学学報（理工学編），**26**，1（1975），151～157
- 4) 笠原俊男： エアトラックを利用したエネルギー変換の実験，新潟県立教育センター研究報告第27号 新潟県立教育センター（1979），13～20
- 5) 松尾仁一： 真空鈴の教具改良とその利用，理科だよりNo78，新潟県地区理科教育センター研究協議会（1982），8
- 6) 野村益盛： 高等学校物理における力学運動教材の検討と工夫，昭和53年度紀要 第15号，高知県教育センター，（1978），31～44